

Deutsche Kurzfassung:

## **Modellierung des Übergangs zwischen Landeis und Schelfeis mit dem parallelisierten Landeismodel PISM-PIK**

**Marianne Haseloff** (Diplomarbeit)

Die in den letzten 100 Jahren beobachtete Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um ca.  $0.7^{\circ}\text{C}$  aufgrund erhöhter Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre wurde von einem Meeresspiegelanstieg um ca. 17cm begleitet. Vorhersagen über zukünftige Meeresspiegelanstiege gehen weit auseinander und die Eisverluste der Antarktik und Grönlands sind, wie durch den vierten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bestätigt, als die größten Unsicherheitsfaktoren für Prognosen zukünftiger Entwicklungen zu betrachten. Besonderes Augenmerk ist dabei auf das Westantarktische Eisschild zu legen, das zu den sogenannten Kippelementen des Klimasystems gehört. Diese können bereits bei kleinen Störungen einen qualitativ veränderten Zustand annehmen, was im Fall des Westantarktischen Eisschildes einem rapiden Abschmelzen der Eismassen entspräche. Grund hierfür ist die Tatsache, dass große Bereiche des Westantarktischen Eisschildes unterhalb des Meeresspiegels auf dem Grund aufliegen. Die Stabilität dieser sogenannten *marinen* Eisschilde ist seit mehr als 30 Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen, da allein die Westantarktis genügend Eis enthält, um den globalen Meeresspiegel um mehr als 3 m zu erhöhen.

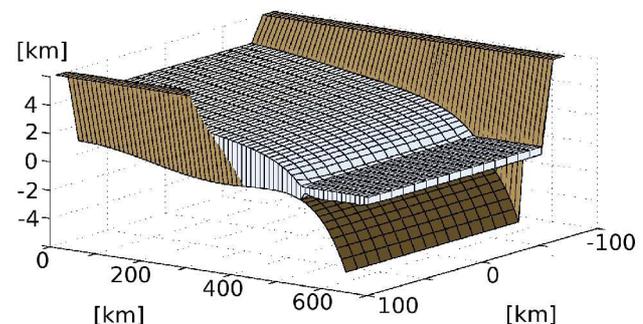
In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie klimatische und topographische Parameter den Eisverlust mariner Eisschilde beeinflussen. Die Resultate zeigen, dass die gegenwärtig beobachteten Änderungen des Klimasystems einen Kollaps des Westantarktischen Eisschildes begünstigen. Einer der Mechanismen, durch den dies erfolgen kann, ist das Abbrechen von schwimmenden Schelfen, die die Westantarktis umranden. Entsprechend des Archimedischen Prinzips verdrängen Schelfe ihr Massenäquivalent an Meerwasser, so dass sie nicht unmittelbar zur Erhöhung des Meeresspiegels beitragen. Stattdessen ist die Bewegung der *Aufsetzlinie*, die Schelfe und auf dem Untergrund aufliegendes Eis (Landeis) trennt, entscheidend für die Massenbilanz. Auf deren Bewegung können Schelfe stabilisierend wirken, wenn sie zusätzliche Reibung an den Seiten und an Aufsetzstellen erfahren. Höhere Atmosphären- oder Ozeantemperaturen können zu einem verstärkten Abbrechen („Kalben“) von Schelfen führen und damit auch die Aufsetzlinie und das Landeis destabilisieren.

Da die Bewegung im Landeis vornehmlich durch Scherkräfte hervorgerufen wird, die Bewegung des Schelfeises aber einer Pfropfenströmung gleicht, muss der Übergang zwischen diesen beiden unterschiedlichen Bewegungsarten in der sogenannten *Übergangszone* erfolgen. Während für die Bewegung des Landeises und der Schelfe jeweils vereinfachte Modelle zur Beschreibung des Eisflusses zur Verfügung stehen, die den Rechenaufwand deutlich verringern können und damit für die Modellierung groß-skaliger Probleme wie die Antarktis anwendbar sind, existiert für die Beschreibung der Übergangszone bisher keine derartige Lösung. Dieses Problem wird in der vorliegenden Arbeit ausgehend von Bueler & Brown (2009) durch eine lineare Superposition dieser beiden asymptotischen Theorien gelöst. Dieser Ansatz ist, wie in Abschnitt 2.7 gezeigt, für die Modellierung der Übergangszone geeignet. Darüber hinaus erlauben die Geschwindigkeitsprofile und Oberflächenprofile der modellierten Gletscher eine Definition der Übergangszone. Die reduzierten Modelle zur Beschreibung von Landeis und Schelfeis werden in Kapitel 2 als asymptotische Grenzfälle einer Theorie formuliert.

Um mit dem Model PISM-PIK die Stabilität mariner Eisschilde untersuchen zu können, wurden Randbedingungen an der Grenze zwischen Eis und überragenden Wänden (Abschnitte 3.1 und 3.2) und der Schelfvorderkante (Abschnitt 3.3) implementiert. Darüber hinaus wurde eine Interpolation der Position der Aufsetzlinie und der Bodenreibung entlang dieser eingeführt, was detaillierte Studien der Bewegung der Aufsetzlinie ermöglicht. Die Mitarbeit an der Entwicklung PISM-PIKs, einer Unterklasse des Parallel Ice Sheet Models, am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung war Teil dieser Arbeit.

Um die Güte der durchgeführten Simulationen zu quantifizieren, wurde die Eignung PISM-PIKs zur Modellierung der Bewegung der Aufsetzlinie im Rahmen des *Marine Ice Sheet Model Intercomparison Projects* (MISMIP) untersucht (Kapitel 4). Ziel dieses Projekts ist es, Ergebnisse verschiedener Modelle zu vergleichen. Dafür werden numerische Studien bestimmter Spezialfälle, die einen Vergleich mit analytischen Lösungen erlauben, durchgeführt. Eine für Modelle dieser Art ungewöhnlich gute Eignung PISM-PIKs zur Modellierung der Aufsetzlinie konnte nachgewiesen werden.

Die Stabilität mariner Eisschilde wird in Kapitel 5 mit Hilfe einer vereinfachten Geometrie, die die wesentlichen Eigenschaften des Westantarktischen Eisschildes aufweist, untersucht. Diese besteht aus einer idealisierten Bucht, deren Untergrund eine Erhebung aufweist. Ein wesentliches Ergebnis ist die Beobachtung eines Hystereseverhaltens (d.h. es besteht eine Abhängigkeit von der Vorgeschichte) der Aufsetzlinie bei Variation des Meeresspiegels, wie im Rahmen einer theoretischen Analyse vorhergesagt (Schoof, 2007b). Ursache für dieses Verhalten ist, dass der Eisfluss an der Aufsetzlinie eine Funktion der Eisdicke (und damit der Topographie) ist. Aus dem gleichen Grund wird eine Instabilität der Aufsetzlinie auf ansteigendem Untergrund beobachtet.



*Vereinfachte Geometrie zur Untersuchung der Stabilität mariner Eisschilde.*

*Weiß: Gletscher*

*Dunkelbraun: Meeresboden*

*Hellbraun: Seitlich begrenzende Wände (der vordere linke Teil ist zur besseren Visualisierung abgeschnitten)*

Parameterstudien zeigen, dass Gletscher mit langen Übergangszonen empfindlicher auf ein Ansteigen des Meeresspiegels reagieren als Gletscher mit kurzen Übergangszonen (Abschnitt 5.2) und bestätigen damit Ergebnisse, die mit anderen Modellen erhalten wurden. Eine Analyse dieser Beobachtungen zeigt, dass dies durch eine erhöhte Kraftübertrag in langen Übergangszonen bedingt wird. Weiterhin wird ein möglicher Kollaps eines marinen Gletschers durch eine Erhöhung der Temperatur erleichtert, da dies zu höheren Verformungsraten führt. Diese Resultate lassen auf eine empfindliche Reaktion der schnell fließenden Antarktischen Gletscher bei einer Veränderung äußerer Parameter schließen.

Untersuchungen ihres Einflusses auf die Stabilität mariner Eisschilde, die seitlich begrenzt werden (Abschnitt 5.3), untermauern die wichtige Rolle von Schelfen: Der kritische Meeresspiegelanstieg, der zu einem Kollaps des marinen Eisschildes führt, hängt stark von den Bedingungen im Schelf ab. Daher sind diese, ausgehend von den Experimenten in Abschnitt 5.3, unter bestimmten Bedingungen in der Lage, einen Kollaps des marinen Eisschildes zu verhindern.